

石灰-钢渣-煤矸石混合料力学性能试验研究*

Experimental Study on Mechanical Properties of Lime-steel Slag-coal Gangue Mixture

孟文清¹, 冀昊¹, 刘金堂², 王鹏¹, 张亚鹏¹, 崔邯龙¹

(1. 河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056038;
2. 河钢集团邯郸钢铁有限责任公司, 河北邯郸 056015)

摘要: 为解决煤矸石等工业固废在公路中应用存在的问题, 本文以煤矸石为主要研究对象, 添加一定量的石灰和钢渣, 制备石灰-钢渣-煤矸石混合料。采用均匀设计方法, 设计 6 组煤矸石混合料配合比, 测试各组混合料的 7 d 无侧限抗压强度、180 d 抗压回弹模量和劈裂强度。利用回归分析的方法, 分别得出煤矸石混合料各掺量与三项力学性能间的回归方程, 并分析混合料各掺量对三项力学性能的影响。结果表明: 该混合料力学性能良好, 可应用于不同等级公路的路面基层。

关键词: 煤矸石混合料; 力学性能; 均匀设计; 回归分析; 路面基层

中图分类号: TU521 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 06-0099-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.016

MENG Wenqing¹, JI Hao¹, LIU Jintang², WANG Peng¹, ZHANG Yapeng¹, CUI Hanlong¹

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. Handan Iron and Steel Co., Ltd., Hegang Group, Handan 056015, China)

Abstract: In order to solve the problems existing in the application of industrial solid waste such as coal gangue in highway, this paper takes coal gangue as the main research object, and adds a certain amount of lime and steel slag to prepare lime-steel slag-coal gangue mixture. Six groups of coal gangue mixture were tested by uniform design method by using the method of regression analysis, it is concluded that coal gangue mixture respectively the content and the regression equation between the mechanical properties of the three, and analysis the mixture content on the mechanical behavior of the three. The results show that the mixture has good mechanical properties and can be applied to the pavement base of different grades of highway.

Keywords: coal gangue mixture; mechanical properties; uniform design; regression analysis; pavement base

0 引言

随着公路工程建设的飞速发展, 我国对石材的消耗日益增多, 不仅耗费了大量的人力物力, 且石料的开采有可能造成严重的生态破坏。煤矸石是伴随着煤炭开采产生的固体废物, 大多以堆存的方式来处理, 这不但占用了土地资源, 影响

* 基金项目: 河北省自然科学基金 (E2020402079, E2022402103)。

作者简介: 孟文清 (1966—), 男, 教授、硕士研究生导师, 主要从事土木工程材料与施工管理方面的教学与科研工作。

收稿日期: 2023-09-14

材料科学

生态环境,而且存在坍塌、滑坡、泥石流等地质灾害隐患^[1]。另一方面随着钢铁工业的蓬勃发展,我国每年都要产生大量的钢渣,积存的钢渣占用土地对环境也会产生不良影响。因此,如果能将煤矸石、钢渣等工业固体废弃物应用于公路工程,不仅可以减少石材资源的开发,还可以促进工业固体废弃物的大量消纳,解决废弃物的堆存问题^[2]。

近年来,国内外学者以煤矸石为研究对象,添加一定量的无机结合材料,制备成煤矸石混合料,依托工程应用实例,证明了煤矸石混合料作为路面基层材料的可行性^[3-5]。钢渣作为工业固废,其密度大,强度较高,将其作为道路材料可进一步提高基层承载力,降低工程建设成本^[7-9]。本文以煤矸石为主要研究对象,添加一定量的石灰和钢渣,制备成石灰-钢渣-煤矸石混合料,通过均匀设计,研究煤矸石混合料的力学性能与混合料各掺量之间的关系,旨在为工程实际应用提供理论依据和技术支撑。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

(1) 煤矸石:选用邯郸市峰峰矿区自燃煤矸石,以页岩为主,外观呈红褐色,破碎过31.5 mm筛,级配曲线如图1所示,化学组成和物理性质见表1和表2。

表1 煤矸石化学组成

Table 1 Chemical composition of coal gangue

化学组成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃
含量/%	60.75	25.45	4.10	2.01	1.10	2.49	0.92	1.85	1.33

表2 煤矸石物理性质

Table 2 Physical properties of coal gangue

指标	压碎值/%	烧失量/%	自由膨胀率/%	密度/g·cm ⁻³
试验结果	29.86	10.28	10.00	2.40

由表1可直观看出煤矸石主要以SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃为主,其含量占到了90.30%,说明在适当的温度及湿度条件下,煤矸石具有很高的火山灰活性,可有效提高煤矸石混合料整体的强度。由表2可知,所选煤矸石各项物理指标均满足(JTG/T F20-2015)《公路路面基层施工技术细

则》^[11],可应用于路面基层材料。

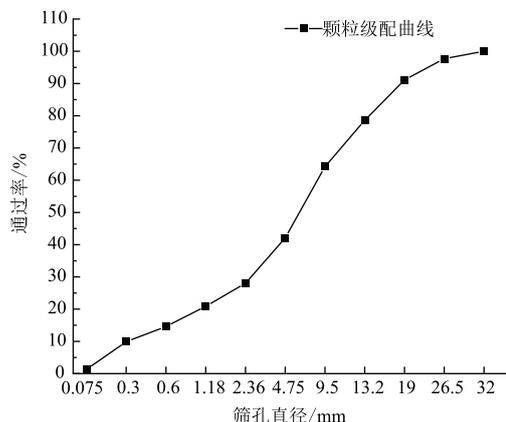


图1 煤矸石级配曲线

Fig. 1 Grading curve of gangue

由图1可知,煤矸石粒径大于5 mm的占总比重的50%左右,曲率系数 C_c 为2.45,在1~3范围内,说明集料粒径齐全,连续分布。不均匀系数 C_u 为29.10>5,说明粒料分布不均匀,其中大粒径颗粒较多,细颗粒较少,因此,在材料组成设计时,可选用煤矸石充当混合料的骨架。

(2) 石灰:选用武安市钙质的石灰粉,有效氧化钙和氧化镁含量36%,低于三级钙质石灰的标准。对于等外石灰,从强度及成本考虑,研究低碱石灰煤矸石路面基层混合料。

(3) 钢渣:钢渣选用邯郸市钢厂未陈化的细钢渣,粒径为0~5 mm,外观呈灰黑色,质地松散不黏结,表观密度 $2.84 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,浸水膨胀率 $1.63\% < 2\%$,满足路用钢渣稳定性要求。

1.2 配合比设计

依据均匀设计的原理^[12],对煤矸石混合料的原材料进行配合比设计。依据前期试验结果^[13-16],煤矸石作为主要原材料,占比宜大于65%;钢渣占煤矸石混合料30%以下;石灰质量百分比宜在3%~12%之间。混合料配合比是采用以煤矸石质量为基准的基准配合比方式,即各原材料的掺入量为相对掺入煤矸石质量的百分数(煤矸石:石灰:钢渣=1: x_1 : x_2);设定各掺合料的掺量范围:石灰 $x_1 \in [0.040, 0.160]$,钢渣 $x_2 \in [0.100, 0.450]$,选用均匀设计表 $U^*(6^4)$,配合比方案见表3。

表 3 煤矸石混合料均匀设计配合比
Table 3 Uniform design mix ratio of coal gangue mixture

配合比编号	1	2	3	4	5	6
石灰 (x_1)	0.088	0.160	0.064	0.136	0.040	0.112
钢渣 (x_2)	0.100	0.170	0.240	0.310	0.380	0.450

1.3 试验方法与条件

按照 JTG E50-2009^[17]《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》，根据不同的配合比设计，对煤矸石混合料进行击实试验，确定混合料的最佳含水量和最大干密度。配置各组最佳含水量条件下的煤矸石混合料，静压成型尺寸大小为 $\Phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的圆柱形试件，标准养护后，进行 7 d 无侧限抗压强度、180 d 抗压回弹模量及 180 d 劈裂强度试验，如图 2 所示，测试结果见表 4。

表 4 煤矸石混合料力学性能试验结果

Table 4 Test results of mechanical properties of coal gangue mixture /MPa

配合比编号	1	2	3	4	5	6
无侧限抗压强度	2.3	2.0	2.4	2.5	2.7	3.5
抗压回弹模量	1742	1387	1548	1628	905	1349
劈裂抗拉强度	0.73	0.49	0.58	0.63	0.40	0.67



(a) 试件成型



(b) 无侧限抗压强度



(c) 抗压回弹模量



(d) 劈裂强度

图 2 力学性能试验过程

Fig. 2 Test process of mechanical properties

2 试验结果分析

2.1 无侧限抗压强度试验结果分析

运用 MATLAB R2020a，基于 7 d 无侧限抗压强度（见表 4），以石灰掺量 x_1 、钢渣掺量 x_2 为自

变量，无侧限抗压强度 R_c 为因变量，进行多项式逐步回归，建立煤矸石混合料各掺量与无侧限抗压强度的回归分析模型：

$$R_c = 29.1164 x_1 - 148.894 x_1^2 + 6.3212 x_2^2 + 0.8091 \quad (1)$$

煤矸石混合料各掺量对无侧限抗压强度的影响曲线如图 3 所示。

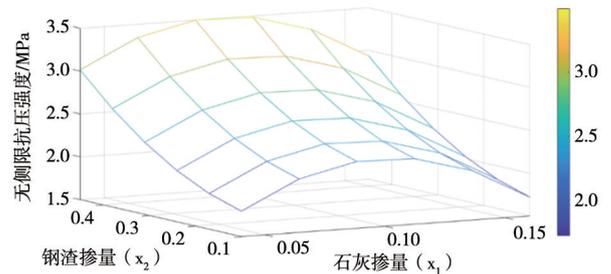


图 3 煤矸石混合料掺量对无侧限抗压强度的影响曲线
Fig. 3 Curve of influence of gangue mixture on unconfined compressive strength

在回归模型中，复相关系数 $R^2 = 0.9858$ ，显著性分析结果 $P = 0.0211 (< 0.05)$ 。表明在自变量 x_1 、 x_2 与因变量 R_c 之间存在很大的相关性，故回归方程显著。

由图 3 可以看出，钢渣掺量 x_2 在给定区间内，随着石灰掺量 x_1 的增加，抗压强度 R_c 先增加后减小；石灰掺量 x_1 在给定区间内，随着钢渣掺量 x_2 的增加，抗压强度 R_c 逐渐增加。

式 (1) 对 x_1 求偏导，

$$\frac{\partial R_c}{\partial x_1} = 29.1164 - 297.788 x_2 \quad (2)$$

由式 (2) 可知，钢渣掺量 $x_2 \in [0.100, 0.450]$ ，当石灰掺量 $x_1 \in [0.040, 0.098)$ 时，

$\frac{\partial R_c}{\partial x_1} > 0$ ，抗压强度 R_c 随着石灰掺量 x_1 的增加由

1.8 MPa 增加到 3.5 MPa；当石灰掺量 $x_1 \in (0.098, 0.160]$ 时， $\frac{\partial R_c}{\partial x_1} < 0$ ，抗压强度 R_c 随着

石灰掺量 x_1 的增加由 3.5 MPa 减小到 1.7 MPa。由此可见，石灰掺量过高，对混合料的无侧限抗压强度产生不利影响。这是由于过量的石灰水化反应生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会和空气中的 CO_2 发生碳酸化

材料科学

作用形成 CaCO_3 。该反应所提供的强度比 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的结晶作用和火山灰反应所提供的强度要低。

式 (1) 对 x_2 求偏导,

$$\frac{\partial R_c}{\partial x_2} = 12.6414 x_2 \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 石灰掺量 $x_1 \in [0.040, 0.160]$, 当钢渣掺量 $x_2 \in [0.100, 0.450]$ 时,

$\frac{\partial R_c}{\partial x_2} > 0$, 抗压强度 R_c 随着钢渣掺量 x_2 的增加由

1.7 MPa 增加到 3.5 MPa。这是由于钢渣密度大, 硬度高, 在机械压实的作用下, 混合料的骨架结构更加密实, 强度也随之提高。

2.2 抗压回弹模量试验结果分析

以石灰掺量 x_1 、钢渣掺量 x_2 为自变量, 180 d 抗压回弹模量 E_c 为因变量, 进行多项式逐步回归, 建立煤矸石混合料各掺量与抗压回弹模量的回归分析模型:

$$E_c = 33805.6 x_1 + 3000.9 x_2 - 159164 x_1^2 - 7682.22 x_2^2 - 229.506 \quad (4)$$

煤矸石混合料各掺量对抗压回弹模量的影响曲线如图 4 所示。

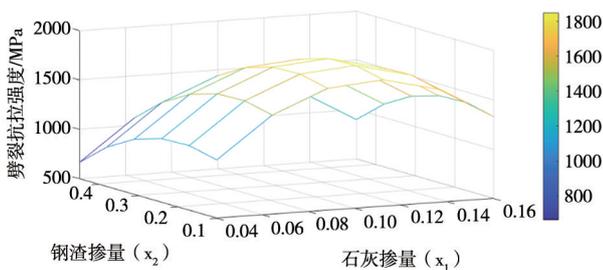


图 4 煤矸石混合料掺量对抗压回弹模量的影响曲线

Fig. 4 Graph of the influence of gangue mixture on compressive rebound modulus

在回归模型中, 复相关系数 $R^2 = 0.9990$, 显著性分析结果 $P = 0.047 (< 0.05)$ 。表明在自变量 x_1 、 x_2 与因变量 E_c 之间存在很大的相关性, 故回归方程显著性较好。

由图 4 可以看出, 钢渣掺量 x_2 在给定区间内, 随着石灰掺量 x_1 的增加, 回弹模量先增加后减小; 石灰掺量 x_1 在给定区间内, 随着钢渣掺量 x_2 的增

加, 回弹模量先增加后减小。

式 (4) 对 x_1 求偏导,

$$\frac{\partial E_c}{\partial x_1} = 33805.6 - 318328 x_1 \quad (5)$$

由式 (5) 可知, 钢渣掺量 $x_2 \in [0.100, 0.450]$, 当石灰掺量 $x_1 \in [0.040, 0.106)$ 时,

$\frac{\partial E_c}{\partial x_1} > 0$, 回弹模量 E_c 随着石灰掺量 x_1 的增加由

663 MPa 增加到 1848 MPa; 当石灰掺量 $x_1 \in$

$(0.106, 0.160]$ 时, $\frac{\partial E_c}{\partial x_1} < 0$, 回弹模量 E_c 随着

石灰掺量 x_1 的增加由 1848 MPa 减小到 890 MPa。可见石灰掺量过多, 对混合料回弹模量产生不利影响。

式 (4) 对 x_2 求偏导,

$$\frac{\partial E_c}{\partial x_2} = 3000.9 - 15364.44 x_2 \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 石灰掺量 $x_1 \in [0.040, 0.160]$, 当钢渣掺量 $x_2 \in [0.100, 0.195)$ 时,

$\frac{\partial E_c}{\partial x_2} > 0$, 回弹模量 E_c 随着钢渣掺量 x_2 的增加由

1091 MPa 增加到 1848 MPa; 当钢渣掺量 $x_2 \in$

$(0.195, 0.450]$ 时, $\frac{\partial E_c}{\partial x_2} < 0$, 回弹模量 E_c 随着

钢渣掺量 x_2 的增加由 1848 MPa 减小到 663 MPa。这是由于钢渣掺量过多, 对石灰的吸附作用会更多, 虽然钢渣能与水反应提供一定的胶凝物质, 但是石灰的水化还是起主导作用的, 如果石灰过多被吸附, 混合料的强度反而会降低。就本试验而言, 20% 钢渣掺量为最佳, 继续掺入过多的钢渣后反而会降低混合料的回弹模量。

2.3 劈裂强度试验结果分析

以石灰掺量 x_1 、钢渣掺量 x_2 为自变量, 180 d 劈裂抗拉强度 R_t 为因变量, 进行多项式逐步回归, 建立煤矸石混合料各掺量与劈裂强度的回归分析模型:

$$R_t = 15.1736 x_1 - 0.1752 x_2 - 73.1647 x_1^2 - 0.031 \quad (7)$$

煤矸石混合料各掺量对劈裂强度的影响曲线

如图 5 所示。

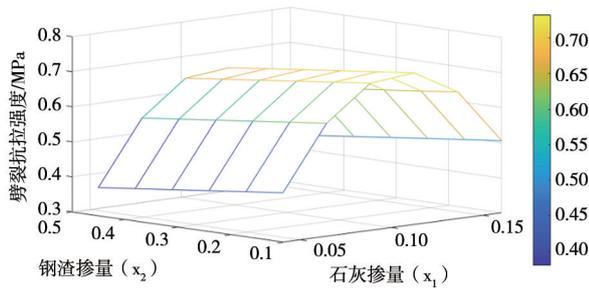


图 5 煤矸石混合料掺量对劈裂强度的影响曲线

Fig. 5 Curve of influence of gangue mixture on cleavage strength

在回归模型中, 复相关系数 $R^2 = 0.9926$, 显著性分析结果 $P = 0.01$ (≤ 0.01)。表明在自变量 x_1 、 x_2 与因变量 R_i 之间存在很大的相关性, 故回归模型显著。

由图 5 可以看出, 钢渣掺量 x_2 在给定区间内, 随着石灰掺量 x_1 的增加, 劈裂强度 R_i 先增加后减小; 石灰掺量 x_1 在给定区间内, 随着钢渣掺量 x_2 的增加, 劈裂强度逐渐减小。

式 (7) 对 x_1 求偏导,

$$\frac{\partial R_i}{\partial x_1} = 15.1736 - 146.3294 x_1 \quad (8)$$

由式 (8) 可知, 钢渣掺量 $x_2 \in [0.100, 0.450]$, 当石灰掺量 $x_1 \in [0.040, 0.104)$ 时,

$\frac{\partial R_i}{\partial x_1} > 0$, 劈裂强度 R_i 随着石灰掺量 x_1 的增加由

0.38 MPa 增加到 0.73 MPa; 当石灰掺量 $x_1 \in$

$(0.104, 0.160]$ 时, $\frac{\partial R_i}{\partial x_1} < 0$, 劈裂强度 R_i 随着

石灰掺量 x_1 的增加由 0.73 MPa 减小到 0.45 MPa。

式 (7) 对 x_2 求偏导,

$$\frac{\partial R_i}{\partial x_2} = -0.1752 \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 石灰掺量 $x_1 \in [0.040, 0.160]$, 钢渣掺量 $x_2 \in [0.100, 0.450]$, $\frac{\partial R_i}{\partial x_2} <$

0, 劈裂强度 R_i 随着钢渣掺量 x_2 的增加由

0.73 MPa 减小到 0.38 MPa。这是由于过多的钢渣掺量给结构带来了很多的空隙, 使得试件的总表面积减小, 胶凝材料与集料间的粘结强度降低,

劈裂强度则降低。

2.4 力学性能综合分析

通过上述对煤矸石混合料基本力学性能试验研究, 得出了混合料三项力学性能指标范围。7 d 无侧限抗压强度可达到 3.5 MPa, 接近水泥稳定类无机结合料强度, 满足重型特重型公路路面基层使用。180 d 抗压回弹模量为 900~1700 MPa, 180 d 劈裂强度为 0.4~0.7 MPa, 两者均达到了石灰土和石灰土碎石材料的设计参数水平^[17]。结合回归模型 (1)、(4)、(7) 计算分析, 得出了较合理的混合料各掺量范围: 石灰 $x_1 \in [0.080, 0.105]$, 钢渣 $x_2 \in [0.100, 0.195]$, 并针对不同等级公路, 设计了不同的配合比, 如表 5 所示。

表 5 石灰-钢渣-煤矸石混合料路用指标设计参数

Table 5 Lime-steel slag-coal gangue mixture road indicators design parameters

材料名称	公路等级	配合比要求/%	无侧限抗压强度/MPa	回弹模量/MPa	劈裂强度/MPa
石灰-钢渣	高速公路和一级公路	(7-9); (9-15);	2.0~2.5	1500~1800	0.6~0.7
	二级及二级以下公路	(16-20);	2.0	1300	0.5
煤矸石混合料	二级及二级以下公路	(3-6); (74-81)	1.5~2.0	900~1300	0.4~0.5

3 结论

(1) 采用多项式逐步回归的方法, 得出了混合料的无侧限抗压强度、抗压回弹模量和劈裂强度的回归方程, 通过显著性检验, 表明混合料各掺量与三项力学性能间存在很大相关性, 回归方程显著。

(2) 利用回归方程, 分析得出混合料各掺量对三项力学性能的影响: 钢渣掺量在给定区间内, 随着石灰掺量的增加, 混合料的三项力学性能呈现先增加后减小的趋势; 石灰掺量在给定区间内, 随着钢渣掺量的增加, 无侧限抗压强度逐渐增加, 抗压回弹模量先增加后减小, 劈裂强度逐渐减小。

(3) 根据回归试验结果, 得出了较合理的混合料各掺量范围, 即石灰 $x_1 \in [0.080, 0.105]$, 钢渣 $x_2 \in [0.100, 0.195]$, 并针对不同等级公路, 给出了相应的配合比范围, 为工程实际应用提供了理论依据和技术支撑。

材料科学

参 考 文 献

- [1] 贾鲁涛, 吴倩云. 煤矸石特性及其资源化综合利用现状 [J]. 煤炭技术, 2019, 38 (11): 37-40.
- [2] 盛燕萍, 乔云雁, 薛哲, 等. 工业固体废弃物在道路基层应用中的研究进展 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33 (4): 78-81.
- [3] 孙康煤. 矸石混合料路面基层的力学性能研究 [D]. 河北工程大学, 2021.
- [4] 汪钺宸. 二灰稳定煤矸石作路面基层材料的试验及应用研究 [J]. 北方交通, 2017, (7): 112-115+118.
- [5] 李彩惠, 张亚鹏, 王海燕, 等. 煤矸石混合料路面基层施工工艺研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2013, 30 (3): 54-56.
- [6] 李明, 李昶, 郭雨鑫, 等. 水泥稳定碎石-煤矸石混合料性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 3809: 2895-2901+2909.
- [7] 冀欣, 盛燕萍, 路再红, 等. 掺加钢渣的半刚性基层材料性能 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2021, 41 (4): 21-31.
- [8] 吴旻. 二灰钢渣土用于公路基层的试验研究 [D]. 南京林业大学, 2009.
- [9] ZHOU Q W, LING T Q, WU M. Application study of steel slag in pavement base [J]. Subgrade Engineering, 2011 (4): 144-146.
- [10] MA Q Q, LIU H. Analysis of obstacle of development and application that coal gangue used in china road engineering [J]. Advanced Materials Research, 2014 (900): 510-513
- [11] 中华人民共和国交通部 JTG /T F20—2015, 公路路面基层施工技术细则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [12] 黄俊强, 陈仕周, 慕海瑞, 等. 均匀设计、回归分析在排水性混合料配比设计中的应用研究 [J]. 中外公路, 2009, 29 (5): 239-242.
- [13] 孟文清, 全建升, 崔邯龙, 等. 石灰-粉煤灰稳定煤矸石混合料抗压强度试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2012, 6: 70-72.
- [14] 徐献海, 王延, 张聚军, 等. 煤矸石混合料抗压回弹模量试验研究 [J]. 煤炭工程, 2014, 46 (7): 111-113.
- [15] 孟文清, 张志飞, 张亚鹏, 等. 煤矸石混合料劈裂强度试验研究 [J]. 施工技术, 2013, 4210: 58-60.
- [16] 中华人民共和国交通部 JTG E51—2009, 公路工程无机结合料稳定材料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [17] 黄祖德. 煤矸石混合料在路面基层中的应用性能研究 [D]. 河北工程大学河北省. 2014.
- [18] 黏沥青混合料水稳定性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (11): 3847-3853.
- [5] 谭波, 刘学文. 不同处治方法下酸性闪长岩沥青混合料长期水稳性能室内试验 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2021, 42 (5): 605-610.
- [6] 王蕾, 张正全, 陈启明. 水泥对沥青混合料水稳定性影响试验研究 [J]. 路基工程, 2021 (4): 94-98.
- [7] 于立泽, 刘作强, 张海涛, 等. 功能性沥青混合料排水特性的评价研究 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2021, 35 (8): 106-113.
- [8] 吴小恋. 沥青混合料水稳定性改善研究 [J]. 石油沥青, 2021, 35 (1): 57-60+72.
- [9] 张彩利, 王超, 李松, 等. 钢渣沥青混合料水稳定性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (1): 207-214.
- [10] JTG E20—2011. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2011.
- [11] JTG E42—2005. 公路工程集料试验规程 [S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2005.
- [12] 唐俊成. 抗剥落剂对胶粉改性沥青及混合料性能影响研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [13] 张盼. 抗剥落剂对季节性冻土区沥青混合料路用性能的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [14] 柴金玲, 栗威. 基于 GTM 的沥青混合料配合比设计方法试验研究 [J]. 材料导报, 2020, 34 (S2): 1283-1287.
- [15] JTG F40—2004. 公路沥青路面施工技术规范 [S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2004.

(上接第 80 页)